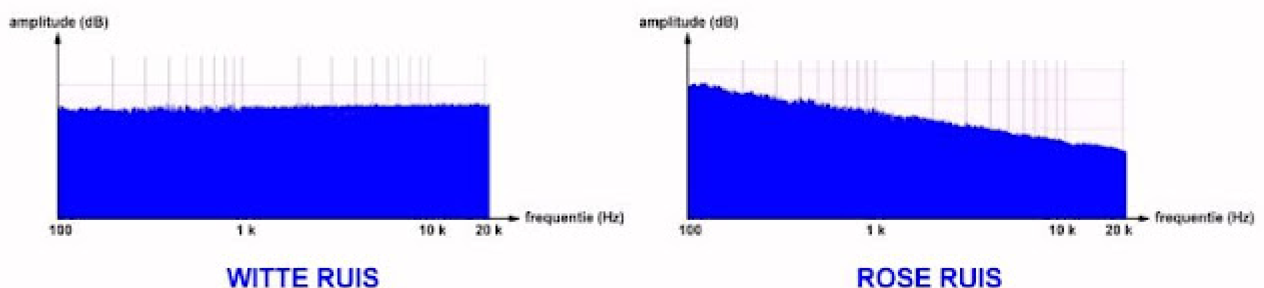
# Ruisgeneratoren

**Hoewel u in de meeste gevallen ruis zoveel mogelijk wilt vermijden bestaan er tóch nuttige toepassingen voor ruisgeneratoren, onder andere bij elektronische muziek en bij het testen van audio-apparatuur.**

**Auteur:** Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
**Email:** josverstraten@live.nl
**Publicatiedatum:** 17-08-2022

## Achtergrondinformatie over ruis

**Hier gaat het over witte en roze ruis**
In het kader van elektronische ruisgeneratoren voor muziek- en audio-toepassingen gaat het echter uitsluitend over het genereren van witte en roze ruis. Het verschil tussen die twee soorten ruis zit hem in de frequentie-samenstelling van het signaal, zie de onderstaande vergelijking.
Witte ruis heeft een '*constante spectrale vermogensdistributie*' of, populairder uitgedrukt, alle frequentiebandjes in het audiogebied zijn in even sterke mate in het signaal aanwezig. Grafisch kan men de bandbreedte van witte ruis dus voorstellen door een horizontale lijn in een amplitude/frequentie-grafiek. De naam '*witte ruis*' is uiteraard naar analogie van '*wit licht*' dat immers ook is samengesteld uit alle golflengten die het menselijk oog kan zien.
De amplitude/frequentie-karakteristiek van roze ruis vertoont, uitgezet op een logaritmische frequentie-as, een lineaire daling met 10 dB per frequentie-decade. De spectrale vermogensdichtheid neemt, vergeleken met witte ruis, af met 3 dB per octaaf. Er zijn dus veel meer lage frequenties dan hoge in de ruis aanwezig.



*Het verschil in frequentie-samenstelling tussen witte en roze ruis. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Toepassingen van witte ruis**
Een dergelijk signaal is uiteraard een ideaal hulpmiddel voor het bestuderen van de akoestische eigenschappen van allerlei systemen. Maakt men witte ruis door middel van een zeer goede versterker en een even goede luidspreker met een zeer vlakke frequentiekarakteristiek hoorbaar in een auditorium, dan kan men door dit geluid ergens in de zaal met een meetmicrofoon op te vangen en dit signaal met een spectrumanalysator te ontleden, veel akoestische eigenschappen van de zaal te weten komen.
In de computer wetenschappen wordt witte ruis soms gebruikt voor het genereren van een reeks echt volledig willekeurige getallen. Dat is namelijk met behulp van software algoritmen niet mogelijk, het resultaat is altijd '*pseudo-willekeurig*'.

**Toepassingen van roze ruis**
Witte ruis wordt dus vaak gebruikt voor het opmeten van de weergave-karakteristiek van een

ruimte of een audio-apparaat. Bij dit soort metingen gebruikt men meestal een groot aantal filters om het te meten ruissignaal te ontleden in een heleboel kleine frequentiebandjes. Nadien gaat men meten hoeveel signaal er in ieder van die bandjes aanwezig is.
Het is echter zeer moeilijk doorlaatfilters te ontwerpen met verschillende centrale frequenties, maar met dezelfde bandbreedte. Het soort filters dat in de analoge elektronica wordt toegepast wordt gekenmerkt door een constante kwaliteitsfactor Q. Dit wil zeggen dat de bandbreedte stijgt met de centrale frequentie. Als men een wit ruissignaal analyseert door middel van een bank van constante Q-filters, zal men vaststellen dat het uitgangssignaal van de filters groter wordt als de centrale frequentie stijgt. Dat is logisch, want hoe hoger de centrale frequentie, hoe breder de doorlaatband van het filter en hoe meer frequenties uit het ruissignaal worden doorgelaten!
Men kan wiskundig berekenen dat een verdubbeling van de centrale frequentie een stijging van de uitgangsspanning met 3 dB tot gevolg heeft. De remedie is dus simpel: u moet het witte ruissignaal door een laagdoorlaat filter sturen met een versterkingsdaling van 3 dB per octaaf! Een octaaf komt immers overeen met de afstand tussen een bepaalde frequentie en tweemaal die frequentie. Het filter moet dus voor iedere frequentieverdubbeling een verzwakking van 3 dB veroorzaken. Roze ruis bevat dus veel meer lage frequenties dan hoge: het normale geluidsspectrum van 20 Hz tot 20.480 kHz omvat tien octaven en bijgevolg zal deze hoogste frequentie met 30 dB verzwakt zijn ten opzichte van de laagste frequentie die in de roze ruis aanwezig is.
Roze ruis wordt dus voornamelijk gebruikt als men de amplitude/frequentie-karakeristiek van een ruimte of een apparaat wilt opmeten met een spectrum-analyzer.

**Witte ruis is de bron van iedere ruisgenerator**
U kunt roze ruis dus vrij eenvoudig afleiden uit witte ruis. Het ligt voor de hand dat men eerst witte ruis maakt en nadien daar roze ruis uit afleidt. Dat ligt nog meer voor de hand als u er rekening mee houdt dat witte ruis van nature ontstaat in een heleboel elektronische onderdelen onder de vorm van thermische ruis of hagelruis.

**Thermische ruis**
Zoals u weet bestaat de materie uit atomen, opgebouwd uit een kern met daar omheen cirkelende elektronen. Door de warmte gaan die elektronen trillen, waardoor zij gemakkelijk van het ene naar het andere atoom kunnen overspringen. Deze volledig willekeurige bewegingen zorgen ervoor dat in een geleider tijdelijk en plaatselijk een elektronenoverschot kan ontstaan. Een fractie van een seconde later kan dit overschot weer zijn opgelost. Deze elektronenbewegingen veroorzaken zeer kleine spanningsverschillen tussen de uiteinden van de geleider. Dat noemt men de thermische ruis. Thermische ruis is van zichzelf zeer breedbandig en wit. In de praktijk zal dus uitsluitend de bandbreedte van de toegepaste schakelingen de bandbreedte van deze ruis beperken.

**Hagelruis**
Deze vorm van ruis is niet te verklaren met de klassieke mechanica. In die mechanica is het vloeien van stroom een continu proces. Als er een potentiaalverschil ontstaat tussen twee punten zal er een vloed van elektronen op gang komen die van het ene punt naar het andere punt door de geleider stroomt. Dat wordt wel eens vergeleken met het met een constante snelheid stromen van water door een rivier.
Dank zij de kwantummechanica weten wij tegenwoordig dat dit een foutieve interpretatie is van de werkelijkheid. Het vrijkomen van een elektron uit een atoom is een statistisch proces, wij kunnen niet exact voorspellen wanneer het atoom een elektron uitstoot. Het kan dus gebeuren dat er op tijdstip t1 een hoeveelheid n elektronen worden uitgestoten en even later op tijdstip t2 slechts m elektronen. Bekeken op macroscopische schaal met uw meetinstrumenten lijkt het weliswaar of er een constante hoeveelheid elektronen stroomt. Op microscopische schaal zal de hoeveelheid elektronen die door de geleider stroomt van moment tot moment verschillen. Dit verschijnsel genereert de schijnbaar onverklaarbare stroomvariaties in buizen en halfgeleiders en wordt hagelruis genoemd. Ook hagelruis is zeer breedbandig en volstrekt wit van kleur.

**Hoe wordt witte ruis gegenereerd?**

Het genereren van witte ruis is niet zo moeilijk. Er zijn elektronische onderdelen die berucht zijn vanwege het feit dat zij vrij veel thermische of hagelruis genereren. Dergelijke onderdelen zijn dus heel geschikt als basis van witte ruisgeneratoren:

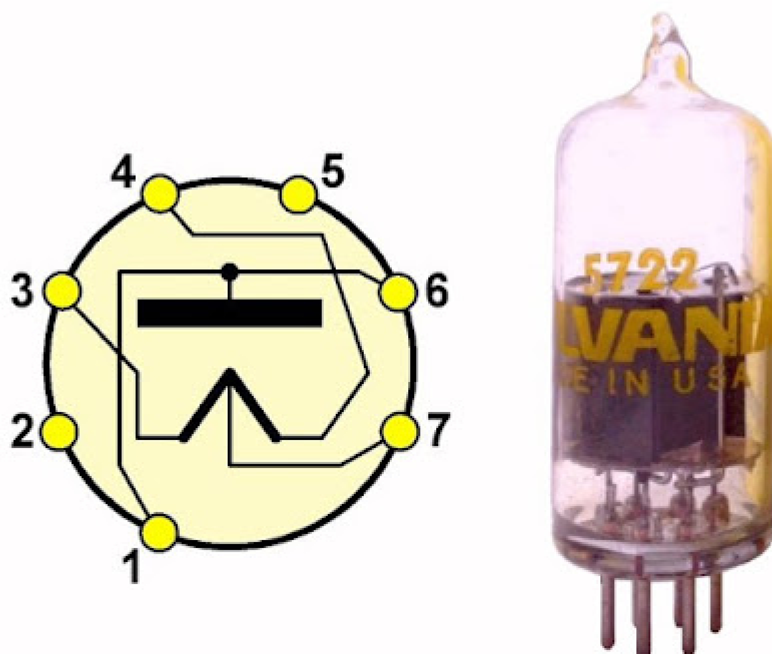
- Elektronen buizen.
- Weerstanden.
- Zenerdioden.
- Transistoren.

**Een digitaal alternatief**
Het nadeel van ruisgeneratoren met de genoemde analoge onderdelen als basis is dat er nogal wat spreiding kan ontstaan tussen identieke schakelingen. Een bepaalde zenerdiode kan wel meer dan twee keer zoveel ruis genereren als een identieke soortgenoot. Dat is niet erg interessant voor serieproductie en vandaar dat men een alternatief heeft ontwikkeld dat ook bij serieproductie betrouwbare specificaties levert: de digitale ruisgenerator. Tweede groot voordeel van dit alternatief is dat de volledige ruisgenerator in één IC kan worden geïntegreerd.

## Witte ruisgeneratoren met elektronen buizen

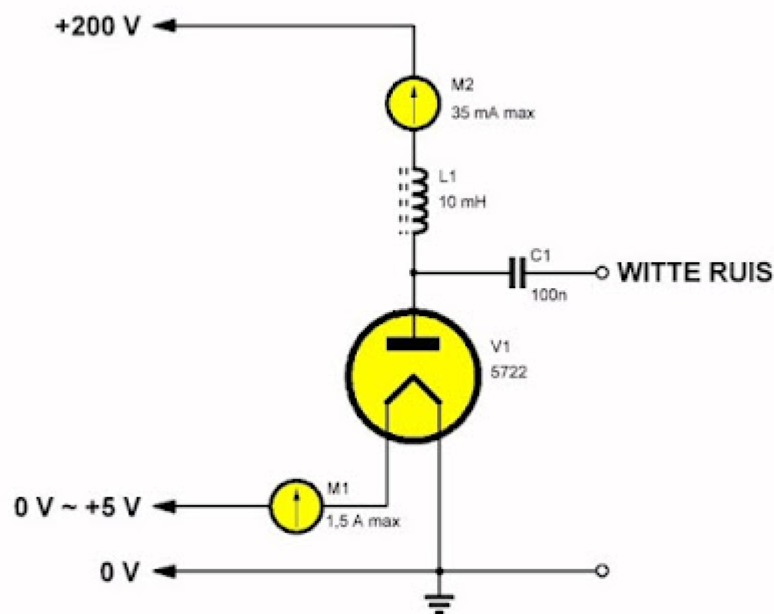
**De vacuüm ruisdiode**
Dit is een speciale diode-buis, die zo is ontworpen dat bij niet al te hoge anodespanningen alle elektronen die door de gloeidraad worden uitgezonden onmiddellijk naar de anode worden getrokken zonder veel ruimtelading te vormen. Omdat de elektronen willekeurig worden uitgezonden, zal de anodestroom worden bepaald door de natuurkundige verschijnselen die hagelruis veroorzaken. Dit wordt gedaan door het filament (de gloeidraad) met opzet een lage emissie te geven. Hiervoor wordt een wolfraam filament gebruikt.

**De 5722 van Sylvania**
De 5722 is een Amerikaanse '*noise diode tube*' ondergebracht in een 7-pins miniatuur behuizing. Deze vacuüm-diode van Sylvania kwam in 1977 op de markt en is nu nog steeds te koop voor ongeveer twintig euro. De maximale anodespanning bedraagt slechts 200 V en de maximale anodestroom is 35 mA. Deze gegevens leggen het maximaal in de buis te dissiperen vermogen vast op 7 W. De anode is voorzien van vleugels die een goede warmteafvoer mogelijk maken.




*De gegevens van de ruis-diode 5722. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Een ruisgenerator met een 5722**
Een schema van een eenvoudige witte ruisgenerator met een 5722 is voorgesteld in de onderstaande figuur. Merk op dat u een RF-smoorspoel als belasting in de anodekring moet opnemen. Deze smoorspoel moet geschikt zijn voor de gebruikte anodestroom. In de anode wordt ook een draaispoelmeter opgenomen met een bereik tot 50 mA. Deze anodekring wordt aangesloten op een gelijkspanning van 200 V. De negatieve pool van deze voeding gaat naar een van de filament aansluitingen.
De gloeidraad van de buis, intern verbonden met de pennen 3 en 4, wordt aangesloten op een regelbare gelijkspanningsvoeding. Deze voeding moet een stroom van 2 A kunnen leveren. Verhoog de gloeidraadspanning geleidelijk totdat de stroom ongeveer 1,3 A wordt. De gloeidraad gaat nu fel oplichten en er begint anodestroom te vloeien. Verhoog de filamentspanning tot de anodestroom gelijk wordt aan ongeveer 30 mA.
De ruisspanning wordt via een hoogspanningscondensator C1 afgetakt van de anode.



*Een witte ruisgenerator met een 5722. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Andere vacuüm ruisdioden**
Er zijn in de vorige eeuw nog andere ruisbuizen ontwikkeld, waarvan de voornaamste zijn:

- 2D2S:
  Dit is een Russische buis met een maximale anodestroom van 40 mA en een maximale anodespanning van 125 V. De gloeidraadspanning bedraagt slechts 1,4 V bij een stroom van 1,6 A.
- 2D3B:
  Ook dit is een Russisch buisje dat u rechtstreeks in een print kunt solderen. De anodespanning bedraagt 120 V bij een anodestroom van slechts 5 mA. De filamentspanning is 2,2 V bij een stroom van 110 mA.
- K81A:
  Een bekende ruisdiode van Philips met een maximale anodespanning van 100 V bij een anodestroom van 15 mA. De gloeidraad wordt gevoed met een spanning van 1,85 V bij een stroom van 2,5 A.



*Van links naar rechts: 2D2S, 2D3B en K81A. (© 2022 Jos Verstraten)*

## Witte ruisgeneratoren met weerstanden

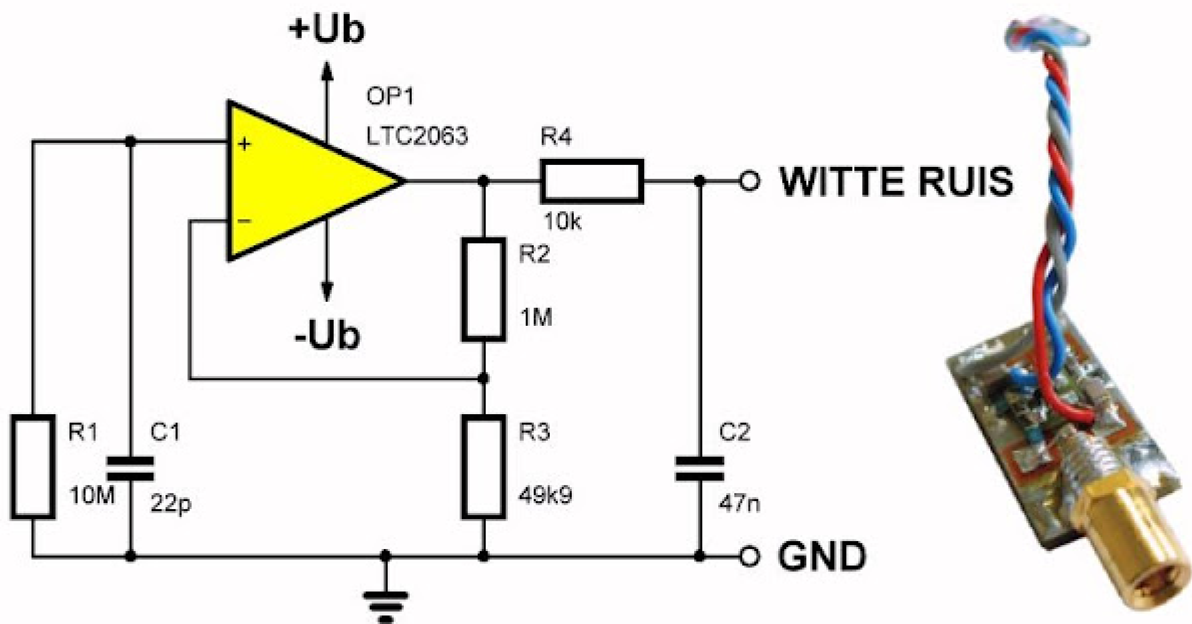
**Johnson ruis levert extreem kleine spanning**
De typische thermische ruis die weerstanden produceren wordt ook wel '*Johnson ruis*' genoemd. Deze ruis is vrijwel wit over een breed frequentiegebied. De dichtheid van de ruisspanning wordt gegeven door de formule:
Uruis = √[4 • $k_B$ • T • R]
waarin:
√: vierkantswortel teken, geldt voor de gehele formule [....]
$k_B$: de constante van Boltzmann 1,380649 • $10^{-23}$ J•$K^{-1}$
T: de absolute temperatuur van de weerstand in °K
R: de waarde van de weerstand in Ω
Uit deze formule volgt dat de waarde van de weerstandsruis extreem laag is, dit dank zij de extreem lage waarde van de constante van Boltzmann. Om u enig idee te geen over de grootte van die ruisspanning vermelden wij dat in een weerstand van 10 Ω een ruisspanning van slechts 0,402 nV ontstaat. Deze waarde stijgt tot 402 nV bij een weerstandwaarde van 10 MΩ.

**Grote versterking noodzakelijk**
Wilt u dus de vrijwel ideale witte ruis die over een weerstand ontstaat praktisch gebruiken, dan moet u die extreem lage ruisspanning flink versterken. Daarbij doet zich het probleem voor dat de onderdelen in die versterker ook allemaal ruisspanningen genereren en het bovendien volledig onduidelijk is of al die ruisbronnen witte ruis produceren.
De ruisweerstand moet dus worden afgesloten met een breedband versterker die flink versterkt, maar zélf een verwaarloosbare hoeveelheid ruis produceert.

**Kleine bandbreedte**
Een versterker die ingesteld wordt op een hoge versterkingsfactor heeft per definitie een kleine bandbreedte. Dat betekent dat van de breedbandige Johnson ruis die over de weerstand ontstaat na versterking niet heel veel overblijft. De bandbreedte van praktisch te realiseren witte ruisgeneratoren met een weerstand als basis gaat niet veel verder dan maximaal 10 kHz.

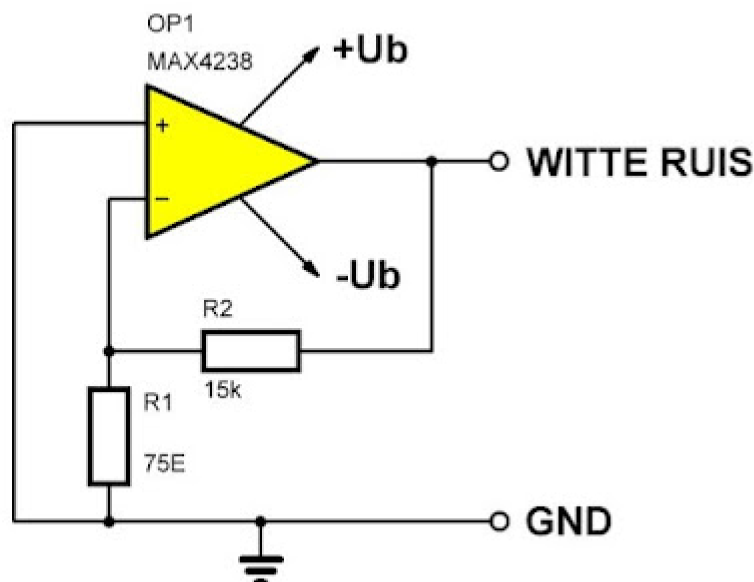
**Een voorbeeldschakeling van Analog Devices**
In de onderstaande figuur is een schema voorgesteld van een witte ruis generator die als bron de Johnson ruis gebruikt die over de weerstand R1 ontstaat. Dat is een speciale dunne-film weerstand van Vishay/Beyschlag met als typenummer MMA0204. Deze ruis wordt

versterkt met een LTC2063. Dat is een '*Zero-Drift Operational Amplifier*' van AD zélf. De schakeling werkt als een inverterende versterker waarvan de versterkingsfactor wordt gegeven door de verhouding tussen R2 en R3. De bandbreedte van de ruis die op de uitgang verschijnt loopt van 1 Hz tot 3 kHz.
Rechts in de onderstaande figuur is een voorbeeld gegeven van de opbouw van de schakeling op een klein printje.




*Audio ruisgenerator met een bandbreedte van 3 kHz. (© 1995 Analog Devices)*

**Subsone ruisgenerator met een MAX4238**
De witte ruisgenerator die is voorgesteld in de onderstaande figuur produceert witte ruis met een bandbreedte van 0,003 Hz tot ongeveer 3 kHz. Als ruisgenerator wordt een dunne-film weerstand R1 van slechts 75 Ω gekozen. De thermische ruisspanning die over dit onderdeel ontstaat wordt versterkt met een MAX4238. Dat is een op-amp met extreem lage offset, drift en ruis. De eigen ruisspanning bedraagt bijvoorbeeld slechts 1,5 $\mu V_{top\text{-}tot\text{-}top}$ in het frequentiegebied van DC to 10 Hz.

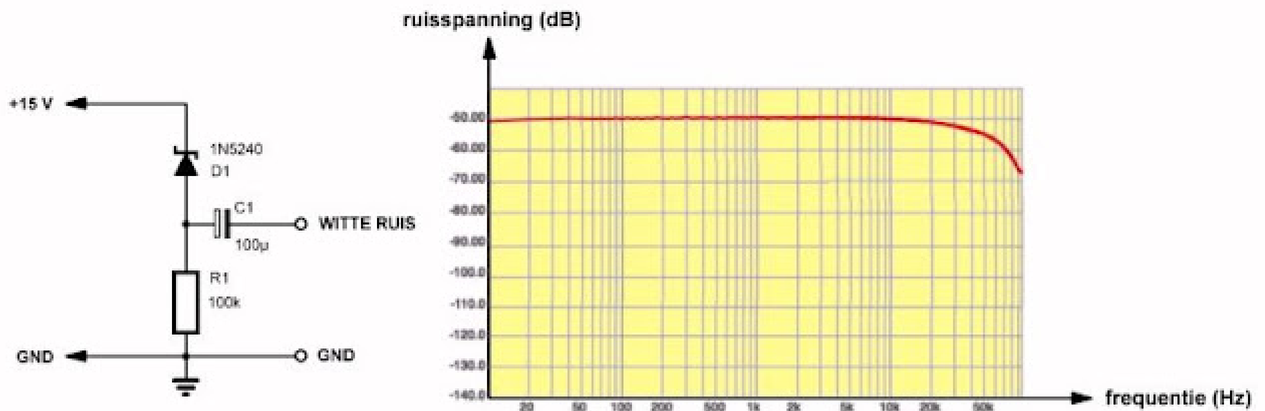



*Subsone ruisgenerator met een 75 Ω weerstand. (© 2008 EDN)*

## Witte ruisgeneratoren met zenerdioden

### Zeer ruisige onderdelen

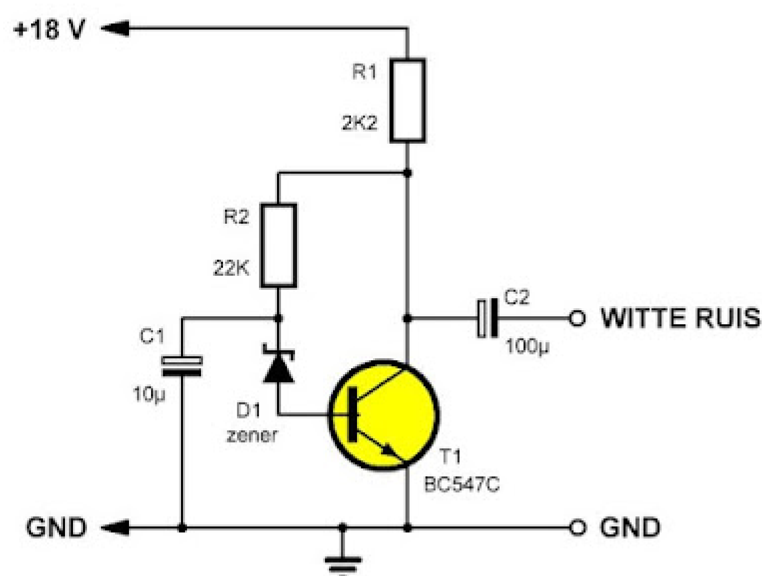
Zenerdioden zijn berucht vanwege de ruis die zij produceren. In de onderstaande grafiek ziet u bijvoorbeeld het ruisniveau dat ontstaat over een in serie met een 1N5240 10 V zenerdiode geschakelde weerstand van 100 kΩ. De bandbreedte van de ruis is vrijwel ideaal wit tot meer dan 20 kHz is dus uitstekend bruikbaar voor experimenten en metingen in het audiogebied.




*De ruis geproduceerd door een 10 V zenerdiode. (© 2022 Jos Verstraten)*

### Witte ruisgenerator met zenerdiode in de terugkoppeling

In de onderstaande figuur is een schema voorgesteld van een witte ruisgenerator waarvan het ruissignaal ontstaat door een zenerdiode op te nemen in de terugkoppeling tussen collector en basis van een transistor. De ruisspanning over de zenerdiode D1 moduleert de stroom die via de terugkoppelweerstand R2 naar de basis van T1 vloeit. Het gevolg is dat ook de collectorstroom gaat variëren op het ritme van de ruisspanning. Van de collector kunt u een ruisspanning van ongeveer 1 $V_{top\text{-}tot\text{-}top}$ afnemen. Als zenerdiode kunt u ieder exemplaar tussen 5,6 V en 12 V toepassen.

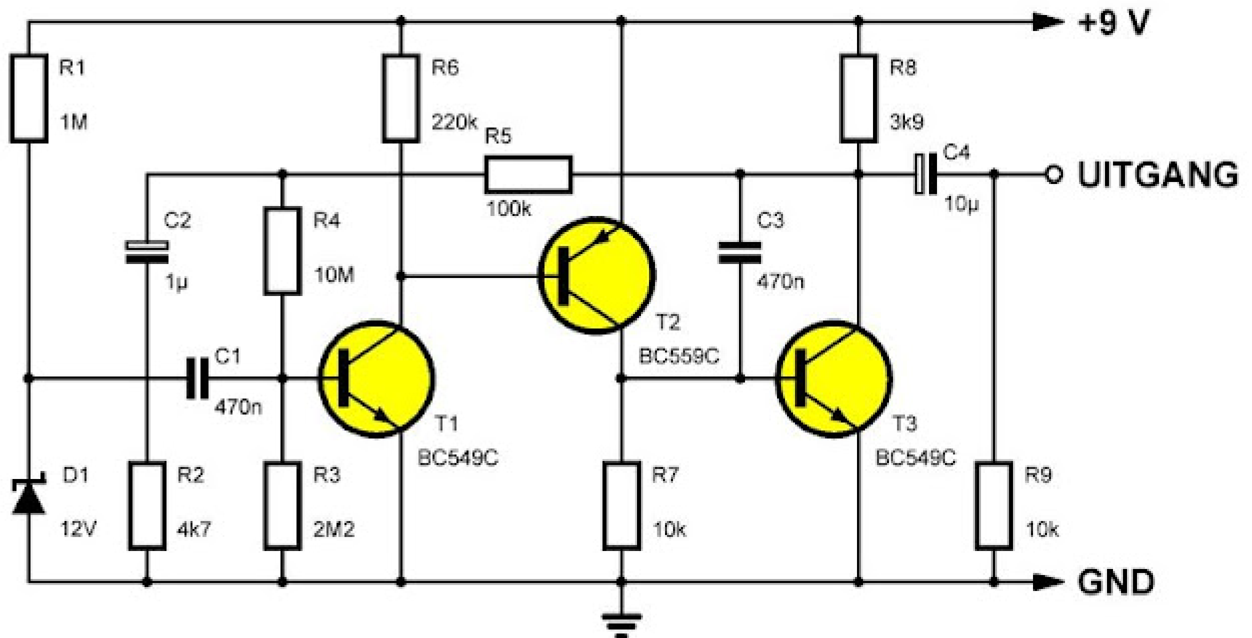



*De eenvoudigste ruisgenerator met een zenerdiode. (© 2022 Jos Verstraten)*

### Ruisgenerator met drietraps transistor versterker

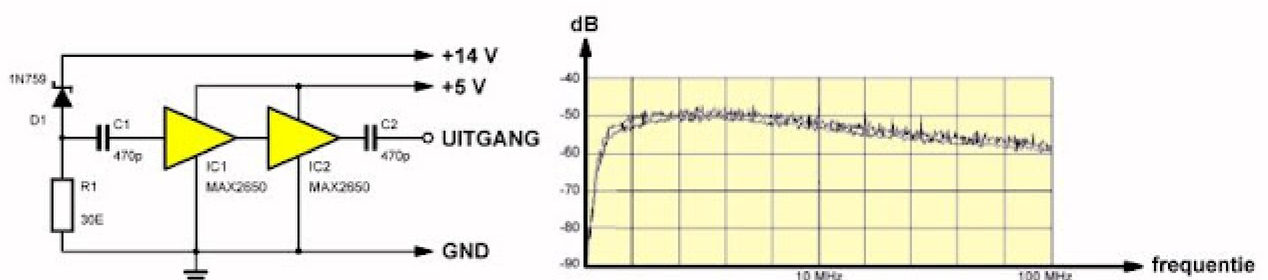
Het onderstaande schema is ooit in '*Elektronica ABC*' verschenen als bron voor het genereren van allerlei muziekeffecten. De ruis die ontstaat over de 12 V zenerdiode D1wordt versterkt door een tweetraps transistor versterker. De eerste trap bestaat uit een standaard een-transistor versterker rond T1. Het signaal op de collector wordt aangeboden aan de

tweede trap, een PNP/NPN-combinatie T2/T3. Het geheel wordt stabiel gehouden door de terugkoppeling via de weerstanden R5 en R2 en de condensator C2.




*Een ruisgenerator met een zenerdiode en een tweetraps versterker. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Ruisgenerator met twee LNA's**
De vorige schakelingen zullen geen zuivere witte ruis produceren omdat de overige onderdelen allerlei ongewenste ruiseffecten aan het uitgangssignaal toevoegen. Om er zeker van te zijn dat er op de uitgang van een ruisgenerator uitsluitend witte ruis ontstaat moet u zo min mogelijk extra onderdelen inschakelen en uitsluitend onderdelen toepassen die extreem weinig ruis genereren. Dergelijke onderdelen heten '*LNA*', letterwoord van '*Low Noise Amplifier*'. In het onderstaand schema is een dergelijke schakeling voorgesteld die de ruis die over een zenerdiode wordt gegenereerd versterkt door middel van twee van die LNA's. Omdat het ontwerp afkomstig is van Maxim hebben de ontwerpers uiteraard LNA's van dit merk geselecteerd: MAX2650. Deze lage ruis versterkers hebben een spanningsversterking van 19 dB en een bandbreedte van 1 GHz. Omdat de versterkers laagohmig zijn moet ook de zenerbron laagohmig zijn. Vandaar dat de weerstand R1 een waarde van slecht 30 Ω heeft. Zoals uit de rechter grafiek blijkt levert deze schakeling ruis tot een frequentie van 100 MHz met een verzwakking van slechts 10 dB. Nog steeds geen ideale witte ruis, maar het komt aardig in de buurt!

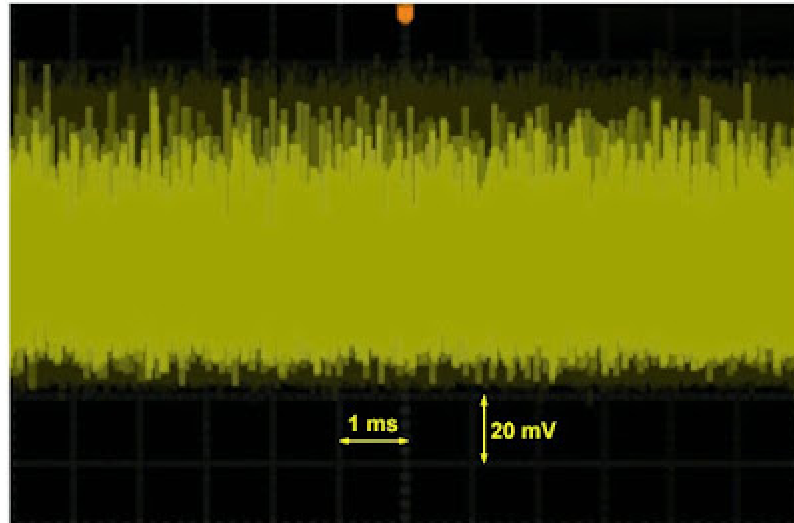



*Een ruisgenerator met twee LNA's als versterkers. (© 2022 Jos Verstraten)*

## Witte ruisgeneratoren met transistoren

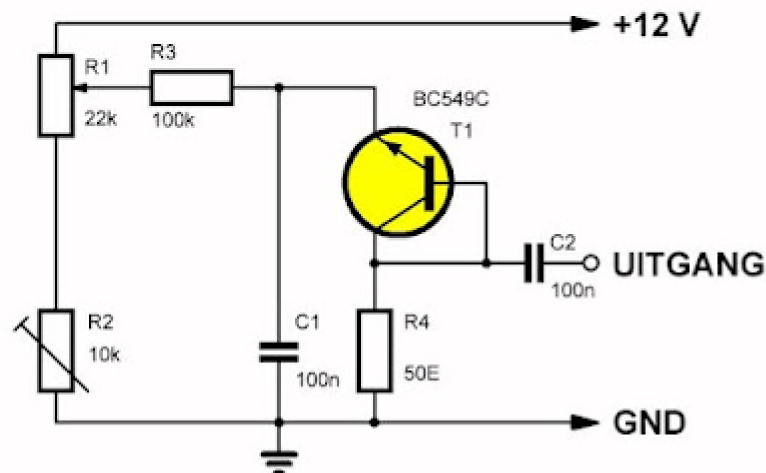
**Een transistor als een soort van zenerdiode**

Als u de basis van een NPN-transistor via een weerstand op een positieve spanning aansluit gaat de stroom van de basis naar de emitter vloeien en gaat de transistor geleiden. De basis/emitter-spanning blijft gelijk aan ongeveer +0,65 V. Als u een negatieve spanning op de basis aansluit en die langzaam laat stijgen gebeurt er eerst niets. De transistor spert en de basis/emitter-spanning volgt de stijging van de aangelegde spanning. Als de spanning een bepaalde waarde overschrijdt gaat er '*zener breakdown*' optreden tussen de basis en de emitter. Deze junctie gaat zich min of meer gedragen als een zenerdiode. Tussen de basis en de emitter staat niet alleen een bepaalde gelijkspanning, maar op die spanning is een tamelijk grote witte ruis gesuperponeerd, zie het onderstaand oscillogram.




*De ruis tussen de basis en de emitter van een NPN-transistor*
*(© 2022 Jos Verstraten)*

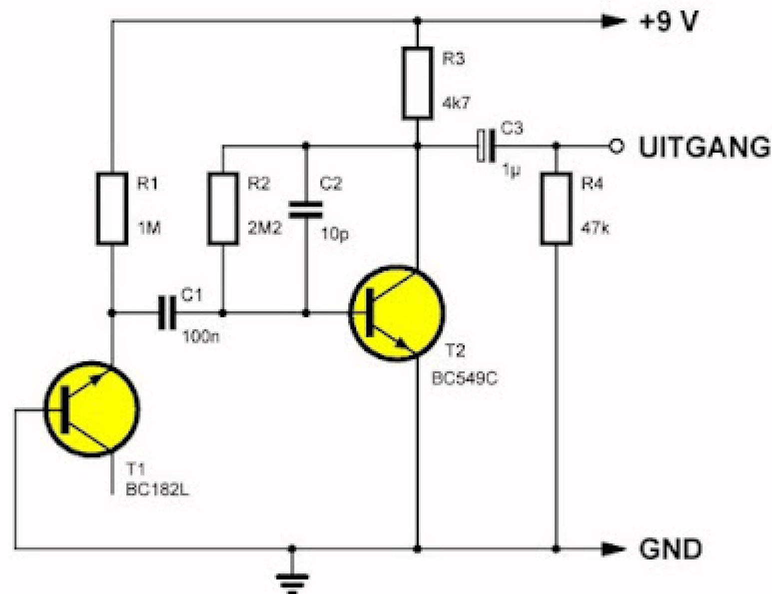
**Een eenvoudige witte ruisgenerator met één transistor**
In het onderstaand schema is een zeer eenvoudige ruisgenerator voorgesteld. Met de potentiometer R1 kunt u de amplitude van de ruis instellen tussen nul en maximaal. Met de instelpotentiometer R2 kunt u de schakeling zó afregelen dat er, met de loper van R1 helemaal in de onderste stand, net geen ruis wordt geproduceerd. De positieve spanning op de loper van R1 gaat via een filtertje R3/C1 naar de emitter van T1. De basis hangt aan de collector en deze twee gaan via een zeer lage weerstand R4 naar de massa. De emitter wordt dus positief ingesteld ten opzichte van de basis waardoor, vanaf een bepaalde spanning, de zener breakdown ontstaat.




*Een witte ruisgenerator met één transistor. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Extra versterking met een transistor versterker**

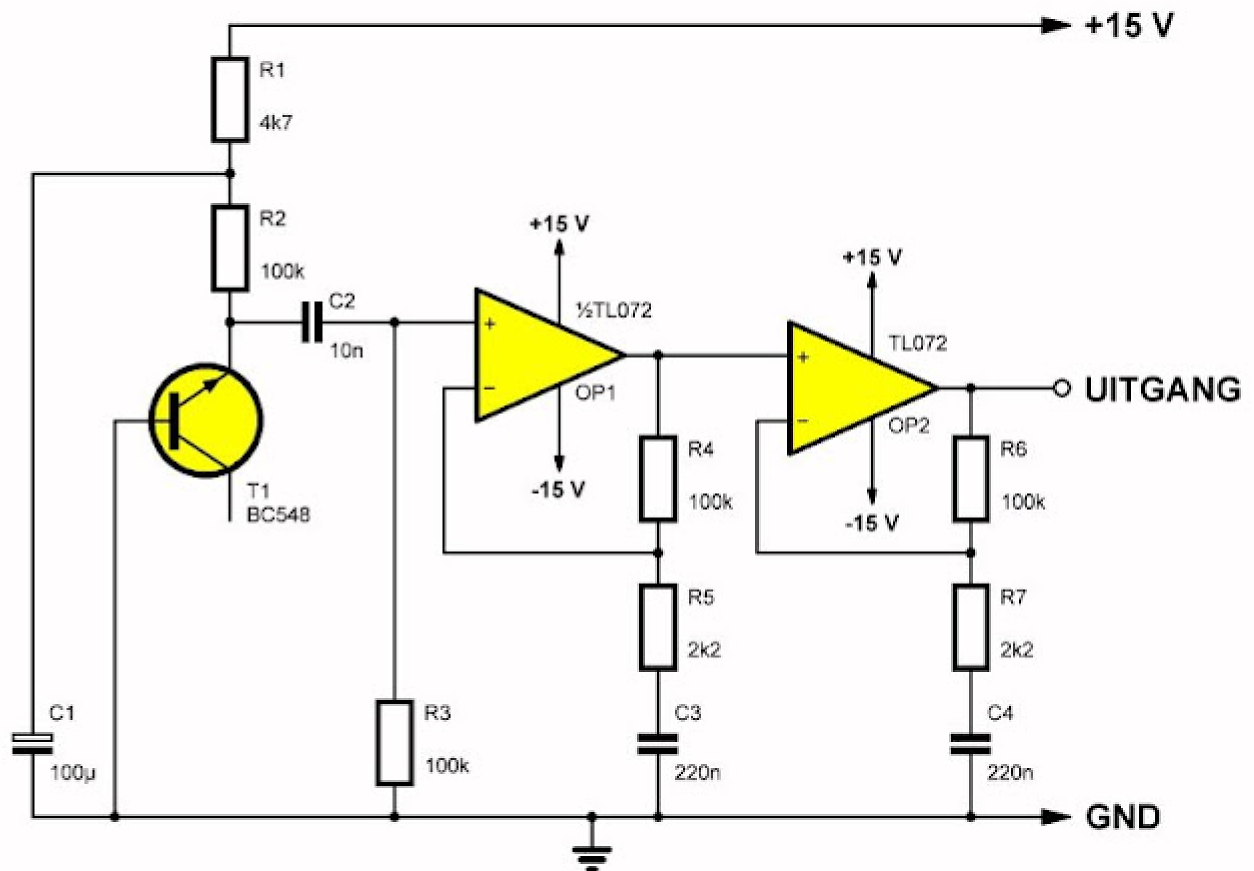
Uiteraard kunt u het ruissignaal dat over de BE-junctie van een transistor ontstaat weer versterken. Het voordeel is dat u in die versterkertrap wat maatregelen kunt treffen om de frequentiekarakteristiek van het ruissignaal zo wit mogelijk te maken. In de onderstaande schakeling, ontwikkeld door ene '*synthnerd*' is dat gedaan door wat te spelen met de waarde van de condensatoren C1, C2 en C3. Met de gekozen waarden wordt een vrij rechte grafiek gekregen tussen 10 Hz en 20 kHz.




*Een witte ruisgenerator met extra versterking. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Witte ruisbron voor een synthesizer**

De onderstaande schakeling is in 1999 ontworpen door René Schmitz en gebruikt twee op-amp's om de transistorruis flink te versterken. Omdat gebruik wordt gemaakt van 'gewone' op-amp's lijkt het niet erg waarschijnlijk dat deze schakeling echte witte ruis genereert. De schakeling is echter heel goed bruikbaar als ruisbron bij een synthesizer.
De twee op-amp's zijn geschakeld als niet-inverterende versterker waarbij de spanningsversterking wordt bepaald door de weerstanden R4/R5 en R6/R7. Met de gekozen weerstanden versterkt iedere trap ongeveer vijftig maal! De condensatoren C3 en C4 zorgen ervoor dat deze versterking alleen geldt voor de wisselspanning van de ruis. De offsetspanningen van de twee op-amp's worden dus niet versterkt. Omdat de op-amp's symmetrisch worden gevoed met ±15 V en de niet-inverterende ingang van OP1 aan de massa hangt zal het ruissignaal op de uitgang rond GND-potentiaal variëren. Er is dus geen scheidingscondensator aan de uitgang nodig.

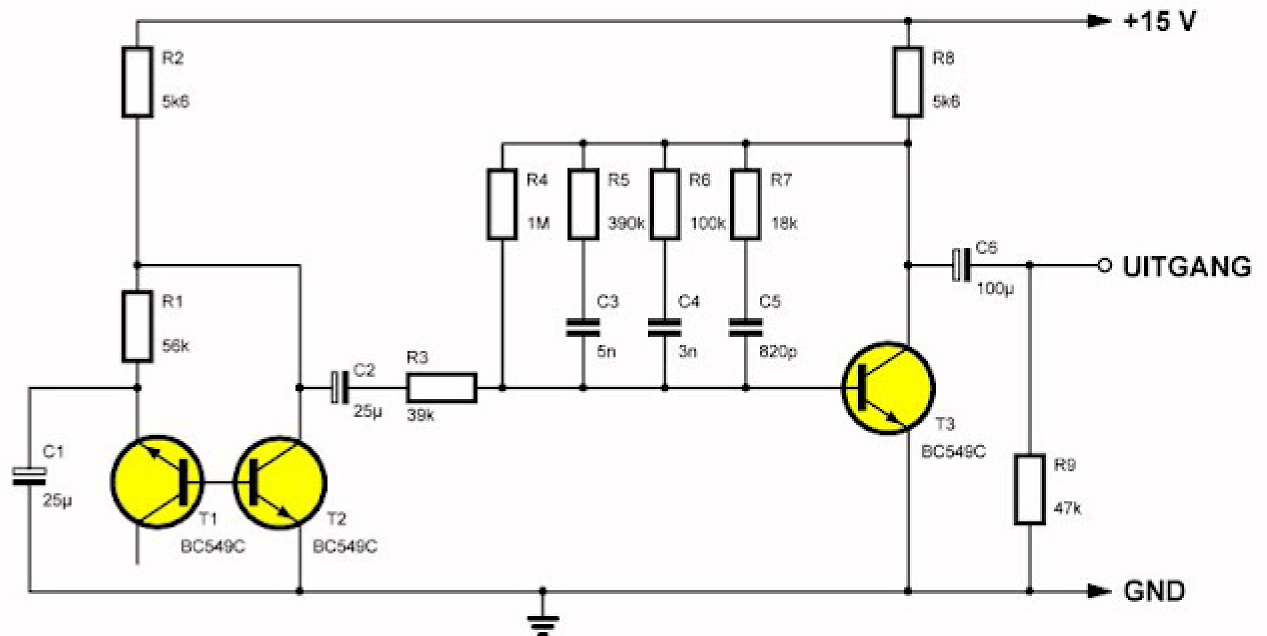


*Witte ruisbron voor een synthesizer. (© 2022 Jos Verstraten)*

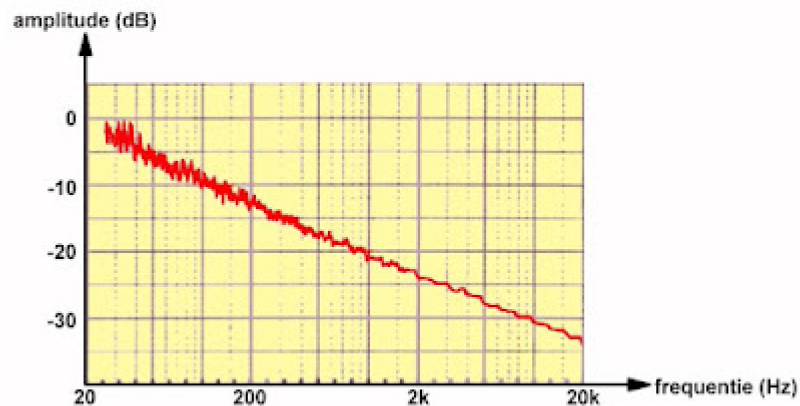
## Van witte naar roze ruis

**Op filteren komt het aan!**
Zoals reeds in de inleiding van dit verhaal geschreven vertoont de amplitude/frequentie-karakteristiek van roze ruis, uitgezet op een logaritmische frequentie-as, een lineaire daling met 10 dB per frequentie-decade. Het volstaat dus achter een witte ruisgenerator een laagdoorlaat filter te plaatsen dat voldoet aan de genoemde verzwakking.
Wat bruikbare filterschakelingen betreft lopen er talloze wegen naar Rome. In de volgende paragraafjes bespreken wij de schema's van een paar roze ruisgeneratoren die wij in de oude papieren vakliteratuur hebben gevonden.

**Roze ruisgenerator met transistoren uit ETI maart 1978**
De witte ruisgenerator is op de reeds bekende manier samengesteld uit een als zenerdiode misbruikte NPN-transistor T1 en een versterker T2. Het filter dat verantwoordelijk is voor de omzetting van witte in roze ruis is opgenomen in de terugkoppeling tussen de collector en de basis van T3. De drie RC-combinaties maken de gewenste frequentiekarakterisiek op een vrijwel ideale manier na, zoals blijkt uit de grafiek. De 30 dB verzwakking tussen 20 Hz en 20 kHz worden keurig geleverd.




*Een roze ruisgenerator uit ETI maart 1978. (© 2022 Jos Verstraten)*



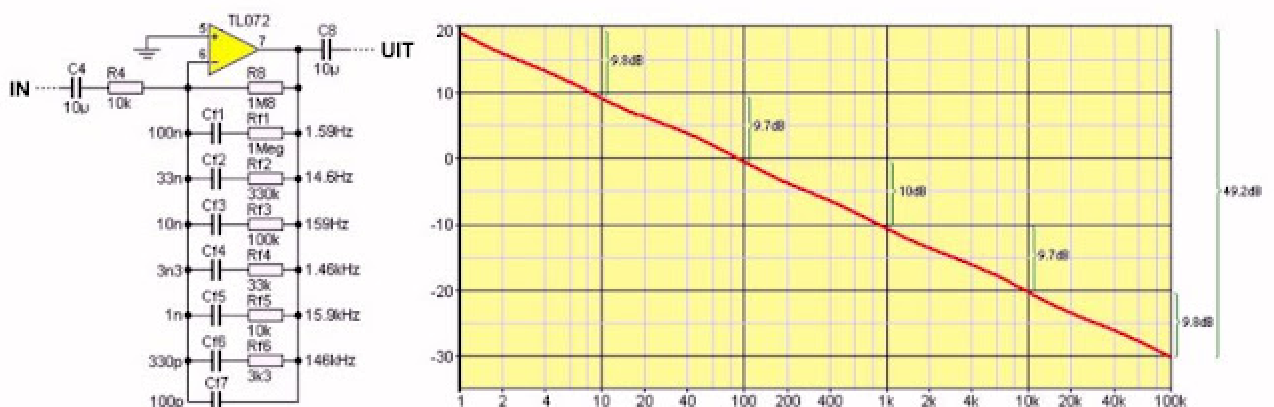

*De frequentiesamenstelling van het uitgangssignaal.*
*(© 2022 Jos Verstraten)*

**Roze ruis generator met op-amp's van TechLib.com**
In deze schakeling wordt de thermische ruis over de weerstand R2 honderd keer versterkt met de op-amp OP1. Zo'n ruisbron met een weerstand is veel reproduceerbaarder dan deze met zenerdioden of transistoren. De ruisspanning over de weerstand is echter zeer laag. Vandaar dat u voor de op-amp een zeer ruisarm exemplaar moet uitkiezen. Rond OP-2 is weer een 3 dB per octaaf filter samengesteld met iets meer onderdelen dan in het vorig ontwerp. De twee elco's C2 en C3 moeten met een LCR-meter *die ook elco's nauwkeurig meet* uit het voorraadbakje worden geselecteerd.

Een roze ruisgenerator van TechLib.com. (© 2022 Jos Verstraten)

**Zeer nauwkeurig -3 dB/octaaf filter**

Tot slot van dit hoofdstuk over roze ruis generatoren is in de onderstaande figuur een zeer nauwkeurig -3 dB per octaaf filter voorgesteld. Deze schakeling is ontworpen door Microchip. Dit filter kunt u achter een willekeurige witte ruisgenerator schakelen. Het filter werkt tussen 1 Hz en 100 kHz en volgt de theoretische verzwakking van 50 dB met een afwijking van maximaal ±1 dB. Het unieke is dat men dit filter heeft weten te ontwerpen met standaard waarden uit de E12 serie weerstanden en condensatoren.

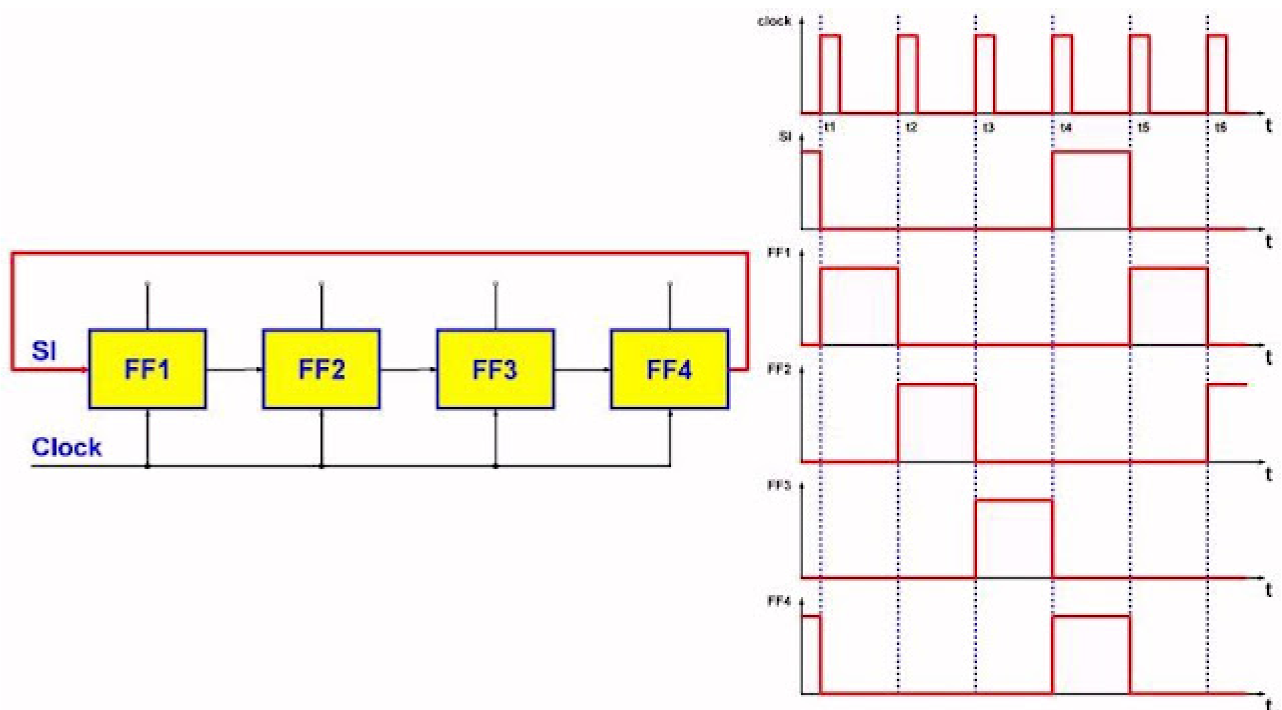


Een zeer nauwkeurig -3 dB/octaaf filter. (© 1999 Microchip)

## Digitale ruis: Pseudo Random Noise Generator PRNG

**Een digitaal alternatief**
Officieel heet deze schakeling '*pseudo random noise generator*', vertaald '*schijnbaar willekeurige ruis generator*'. '*Schijnbaar*', omdat men niet in staat is een digitale schakeling te ontwerpen die een volledig willekeurig signaal genereert. Zo'n digitale ruisgenerator heeft een bepaalde woordlengte die zich herhaalt. Deze pseudo-ruis bestaat dus uit een signaal dat tóch periodiek is. Wél kan de lengte van die periode zonder veel extra elektronica heel erg groot worden gemaakt, zodat de pseudo-ruis wel erg lijkt op analoge '*echte*' ruis.
Zo'n schakeling levert, op het ritme van een klok, een schijnbaar willekeurige volgorde van 'L'- en 'H'-perioden op. Dat digitaal signaal moet u met laagdoorlaat filters omzetten in analoge witte of roze ruis.

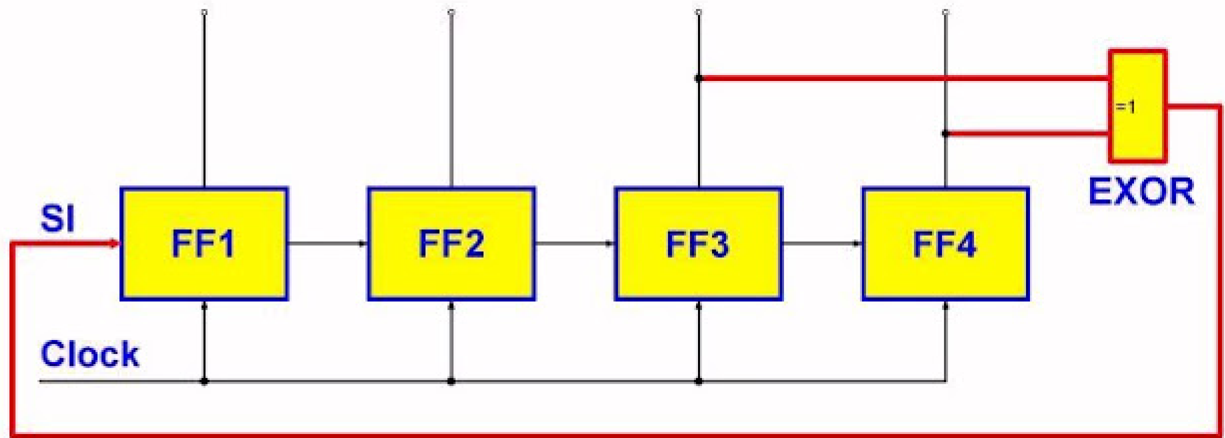
**Schuifregister, het hart van een PRNG**
Het hart van deze schakeling wordt gevormd door een schuifregister. Een schuifregister is opgebouwd uit een aantal in serie geschakelde flip-flop's. In de onderstaande figuur wordt zo'n schuifregister in zijn eenvoudigste vorm voorgesteld. De uitgang van iedere flip-flop is doorverbonden met de ingang van de volgende. Alle bistabiele elementen worden gestuurd door een clock-puls. Een flip-flop neemt de informatie van de voorgaande schakeling over bij de positieve flank van het clock-signaal. Het zal duidelijk zijn dat, door de terugkoppeling van de uitgang van de laatste FF naar de Serial Input, een eenmaal in de schakeling geïntroduceerde puls blijft rondlopen. Aan de uitgangen van het shift-register ontstaat een pulstrein. De herhalingsfrequentie is afhankelijk van het aantal gebruikte FF's. Besluit is dat een rechtstreekse terugkoppeling een periodiek optredende puls aan de uitgangen tot gevolg heeft.

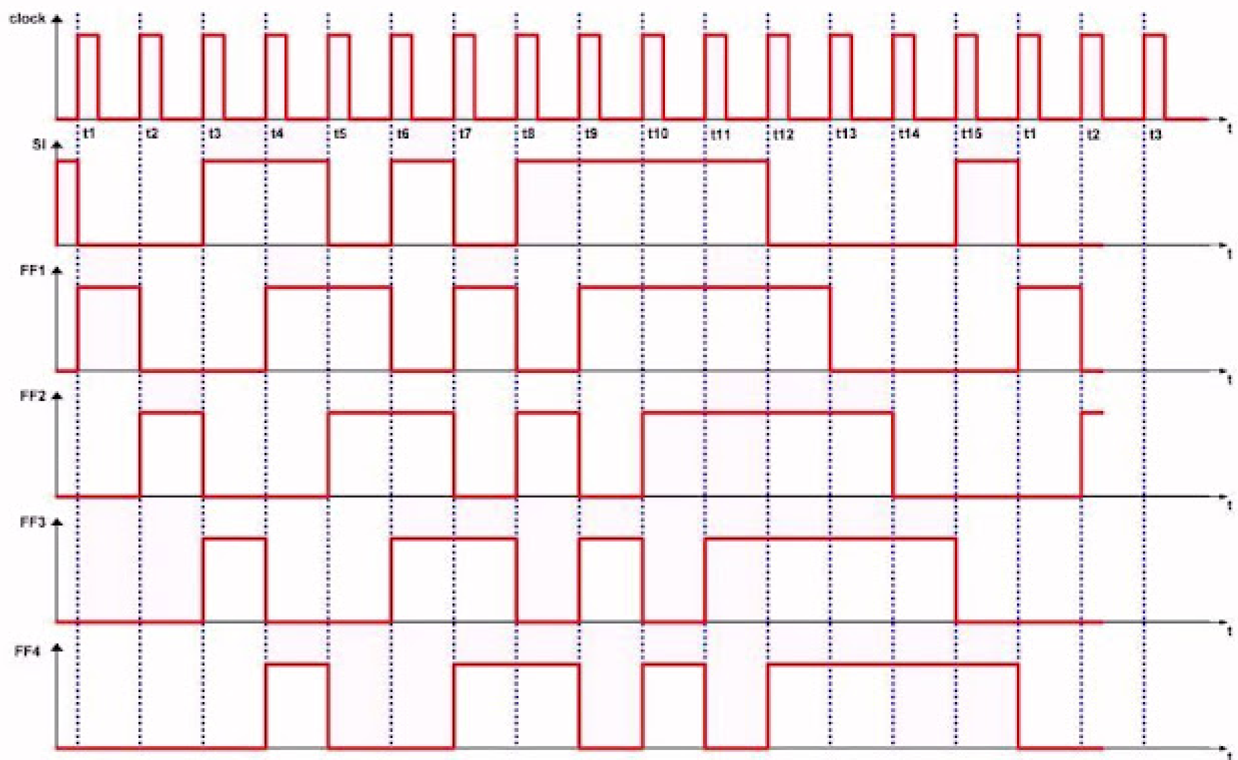


*De werking van een teruggekoppeld schuifregister. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Vervanging van de rechtstreekse terugkoppeling door een exclusive-OR**
In deze stap vormen wij het schuifregister om tot een échte PRNG. Het basisschema en de grafische werking is getekend in onderstaande figuur. De ingangen van een exclusive-OR poort worden aangesloten aan de uitgangen van de twee laatste flip-flop's. De uitgang van de poort stuurt de Serial Input. Stel dat vóór tijdstip t1 alle uitgangen van de FF's 'L' zijn en dat de SI 'H' is. In de praktijk zal deze situatie zich niet voordoen, het beredeneren van de schakeling wordt evenwel vereenvoudigd door deze starttoestand aan te nemen. Op t = t1 wordt FF1 'H'. De volgende clock-puls maakt FF1 weer 'L' en FF2 'H'. Bij t = t3 wordt FF1 =

FF2 = 'L' en FF3 = 'H'.
Op dit ogenblik nemen de ingangen van de poort een tegengesteld logisch niveau aan, zodat de uitgang van de poort en dus eveneens de Serial Input 'H' wordt. Bij de volgende clock-puls wordt de uitgang van de eerste flip-flop dus weer 'H'. Bovendien blijft de SI 'H', de poort heeft immers nog steeds twee verschillende niveaus op haar ingangen. Aan de hand van de grafieken kunt u besluiten dat niet alleen de cycluslengte veel groter wordt (15 clock-pulsen), maar dat eveneens aan de uitgangen van de flip-flop's een opeenvolging van korte en lange impulsen ontstaat. Bovendien is de tijdsduur tussen de impulsen niet constant. Er is een minimale vorm van willekeur ingevoerd.




*De basiswerking van een PRNG. (© 2022 Jos Verstraten)*

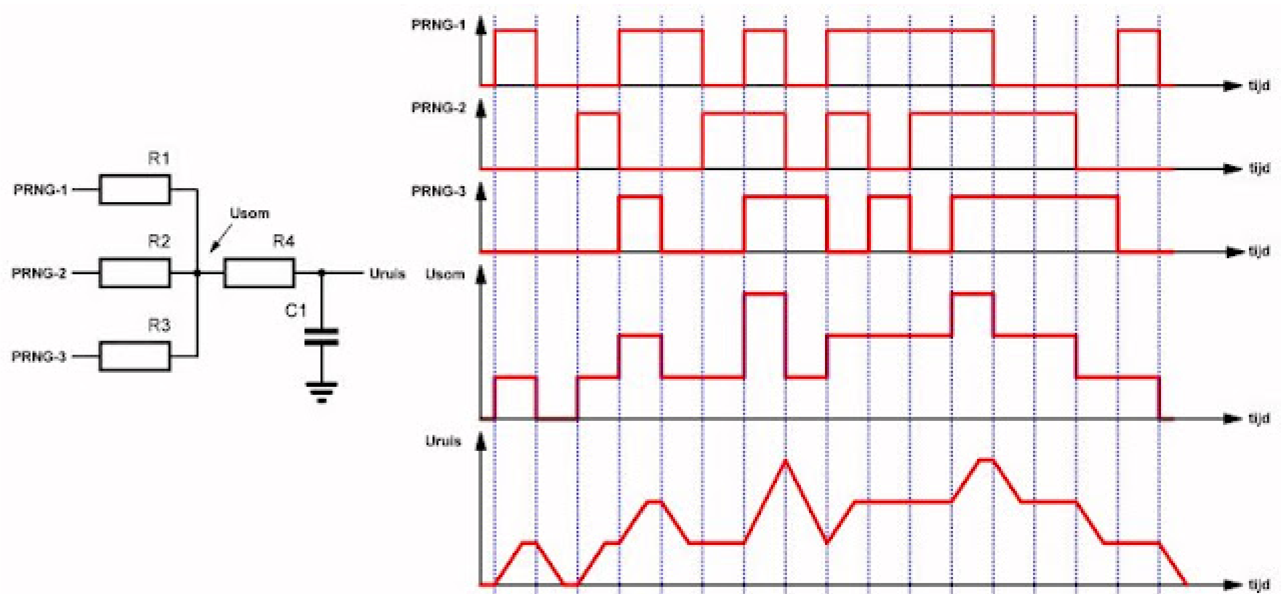
**Spectaculaire groei van de cycluslengte**
Natuurlijk zijn wij met deze schakeling nog ver verwijderd van een als willekeurig te betitelen spanning. Als rechtgeaarde hobbyist voelt u echter aan dat, als u het aantal flip-flop's in de keten laat toenemen, zowel de cycluslengte als de verscheidenheid aan pulsen zal toenemen. In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de cycluslengten bij een bepaald aantal gebruikte flip-flop's. Tevens is aangegeven aan welke FF-uitgangen de ingangen van de poort moeten worden aangesloten. U kunt uit deze tabel besluiten dat de cycluslengte zeer explosief toeneemt. Neemt u bijvoorbeeld vijftien flip-flop's in de keten op en gebruikt u een clock met een frequentie van 1 Hz, dan duurt het exact berekend 9 uur, 6

minuten en 7 seconden vooraleer de schakeling één periode doorlopen heeft! Gedurende deze periodetijd kan aan een uitgang de meest vreemde pulsopvolging ontstaan. Een puls met een breedte van enige seconden kan na korte tijd opgevolgd worden door een puls die minuten duurt. Nadien kan de uitgang weer enige minuten 'L' blijven, om dan weer een kort salvo van smalle pulsen op te wekken, enz.

| AANTAL FLIP-FLOP'S | FF-UITGANGEN NAAR POORT | CYCLUS-LENGTE |
|---|---|---|
| 4 | 3 - 4 | 15 |
| 5 | 3 - 5 | 31 |
| 6 | 5 - 6 | 63 |
| 7 | 6 - 7 | 127 |
| 9 | 5 - 9 | 511 |
| 10 | 7 - 10 | 1.023 |
| 11 | 9 - 11 | 2.047 |
| 15 | 14 - 15 | 32.767 |
| 17 | 14 - 17 | 131.071 |
| 18 | 11 - 18 | 262.143 |
| 20 | 17 - 20 | 1.048.575 |

*Als er meer flip-flop's in de keten worden opgenomen neemt de cycluslengte zeer snel toe. (© 2022 Jos Verstraten)*

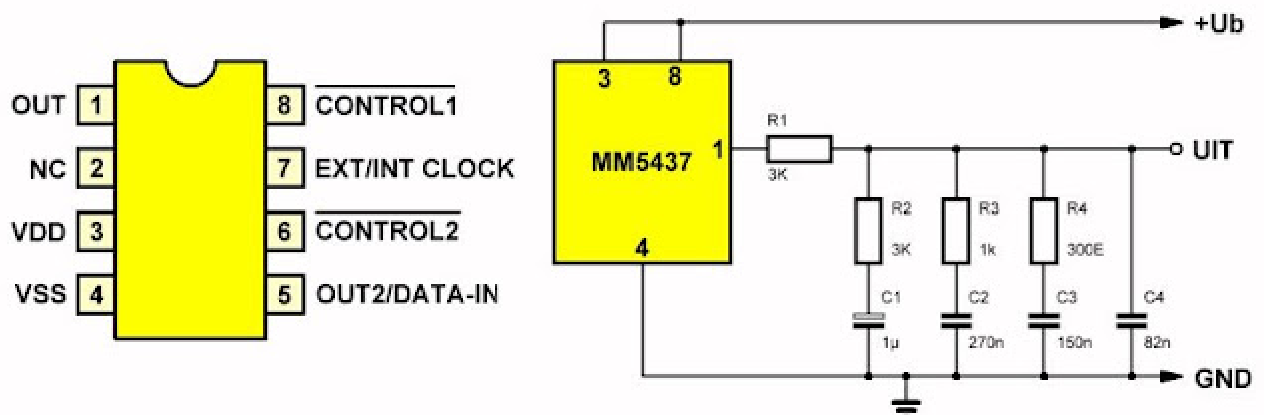
**Van digitaal naar analoog**
Op de uitgangen van het schuifregister ontstaan pulstreinen die willekeurig omschakelen van 'L' naar 'H' en vice versa. Dat is nog alles behalve een mooi ruissignaal! Als u echter diverse uitgangen van het schuifregister in een mengertje R1, R2, R3 bij elkaar optelt ontstaat een signaal $U_{som}$ dat al meer spanningsniveaus kent. Als u dit signaal vervolgens door een laagdoorlaat filter R4/C1 voert ontstaat een mooi wit ruissignaal. Natuurlijk geeft de onderstaande figuur een sterk vereenvoudigde voorstelling van zaken. In de praktijk moet u met minstens vijftien flip-flop's werken en veel meer dan drie uitgangen mengen om iets te krijgen dat op witte ruis lijkt.



*Het omzetten van de digitale pulstreinen in analoge ruis. (© 2022 Jos Verstraten)*

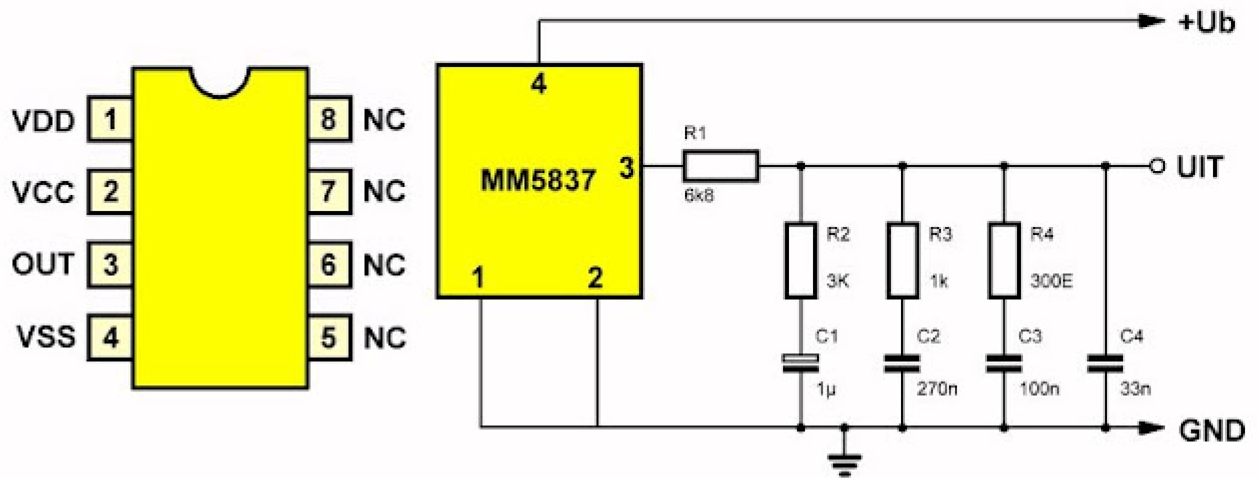
**Zélf ontwerpen of IC kopen?**
Op zich is het een leuke ontwerpklus om zo'n PRNG zélf te ontwerpen, bijvoorbeeld met IC's uit de 4000-familie. Dat hoeft echter niet, want er zijn IC's verkrijgbaar waar die hele digitale schakeling in zit. Hoewel dit vrij oude schakelingen zijn en sommige niet meer worden geproduceerd, zijn zij toch nog verkrijgbaar. Het enige dat u dan nog moet doen is de uitgang afsluiten met een laagdoorlaat filter.

**De MM5437 van NatSemi**
Deze schakeling, die momenteel voor ongeveer € 13,40 verkrijgbaar is, bevat een 23 bit lang schuifregister en een interne klokoscillator. De periodelengte bedraagt maximaal 110 seconden bij een interne klokfrequentie van 280 kHz. De schakeling wordt gevoed met een spanning tussen 4,5 V en 11,0 V. Als u pen 8 aan de voeding legt, kunt u van pen 1 de seriële digitale datastroom aftakken. In de onderstaande figuur zijn de aansluitgegevens voorgesteld en een eenvoudig schema, waarmee u roze ruis maakt met dit IC.



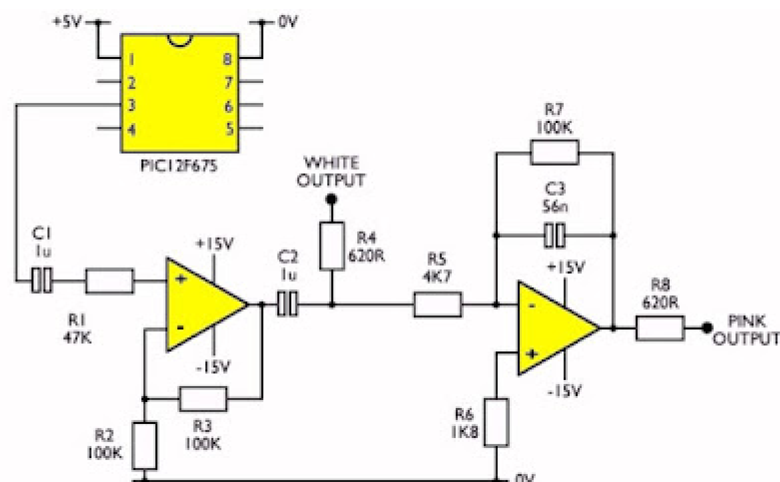
*Een roze ruisgenerator met de MM5437. (© 2022 Jos Verstraten)*

**De MM5837 van NatSemi**
Deze schakeling is een vereenvoudigde versie van de MM5437 is is nog steeds leverbaar voor ongeveer € 8,00. Deze PRNG bevat een 17 bit lang schuifregister en een interne klokoscillator. De periodelengte bedraagt maximaal 2,4 seconden bij een interne klokfrequentie van 112 kHz. De schakeling wordt gevoed met een maximale spanning van 25,0 V. In de onderstaande figuur zijn de aansluitgegevens voorgesteld en een eenvoudig schema, waarmee u roze ruis maakt met dit IC.



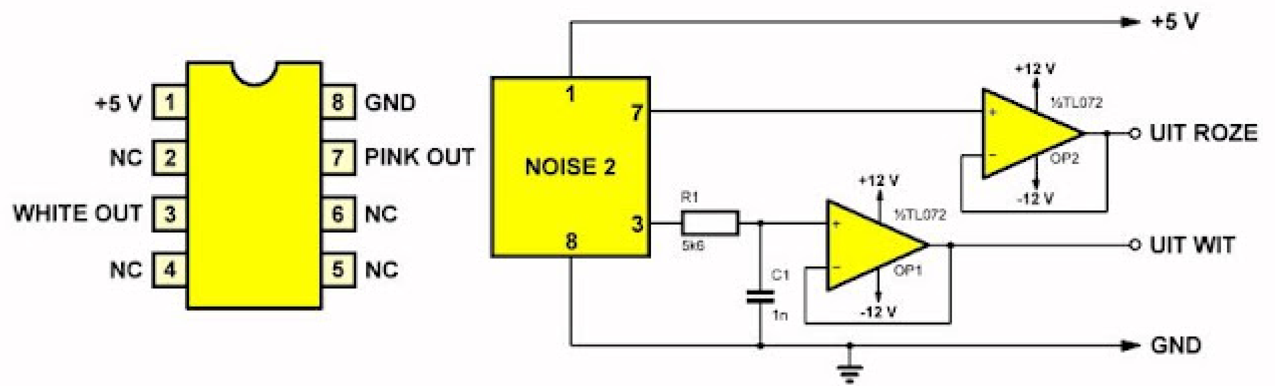

*Een roze ruisgenerator met de MM5437. (© 2022 Jos Verstraten)*

**Electric Druid NOISE 1B**
Nu iets moderner. Het bedrijf '*Electric Druid*' heeft een PIC12F675 omgevormd tot een vrijwel pen-compatibele vervanger voor de MM5837 van NatSemi. Deze chip wordt voor ongeveer € 6,00 op de markt gebracht onder de naam NOISE 1B en is te koop bij in muziek-elektronica gespecialiseerde webshops. In de onderstaande figuur ziet u het schema dat door de fabrikant wordt aanbevolen om deze chip om te vormen tot een witte en roze ruisgenerator.




*Het standaardschema rond de NOISE 1B. (© 2019 Electric Druid)*

**Electric Druid NOISE 2**
Hetzelfde bedrijf heeft met de NOISE 2 een gecombineerde witte en roze ruisbron ontwikkeld. Ook deze chip wordt voor ongeveer € 6,00 aangeboden. De klokfrequentie bedraagt 100 kHz. De filtering gebeurt niet analoog, maar digitaal door middel van het McCartney algoritme. Zowel de witte als de roze ruis wijken binnen het audiogebied maximaal ±2 dB af van de theoretische doorlaatband. In de onderstaande figuur wordt het door de fabrikant voorgeschreven schema voorgesteld. De witte ruis uitgang moet iets worden gefilterd met een simpel RC-netwerkje en met een buffer. De roze ruis uitgang wordt intern '*ge-analogiseerd*' via een vier bit brede DAC, kan niet veel stroom leveren en moet dus ook worden gebufferd.



*Het standaardschema rond de NOISE 2. (© 2022 Jos Verstraten)*